

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**РУПІЧ СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 629.735.083.2:620.179.1:004.032.26

**БАГАТОКЛАСОВЕ РОЗПІЗНАВАННЯ СТАНУ СКЛАДНОГО  
ПРОСТОРОВОГО ОБ'ЄКТА НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМ КЛАСИФІКАТОРОМ**

Спеціальність: 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення  
складу речовин

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Бурау Надія Іванівна**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри приладів і систем орієнтації і навігації.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
заслужений метролог України  
**Квасніков Володимир Павлович**  
Національний авіаційний університет, завідувач кафедри комп'ютерних електротехнічних систем і технологій

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Приміський Владислав Пилипович**  
ТОВ «Автоєкоприлад», генеральний директор

Захист відбудеться «23» квітня 2019 р. о 14 годині 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.18 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. №1, ауд. 293.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «21» березня 2019 р.

В. о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук, професор



В. Г. Колобродов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Складні просторові об'єкти (СПО) авіаційної техніки, нафтогазової галузі та енергетики (резервуари, трубопроводи), спеціального призначення (гідротехнічні споруди, захисні споруди, підземні сховища) є об'єктами критичної інфраструктури, руйнування яких становить загрозу для навколишнього природного середовища, життя та здоров'я людей. За звичай такі об'єкти характеризуються великою розмірністю, нестаціонарністю процесів, розподіленістю параметрів, нелінійністю, неповнотою контролю зовнішніх впливів, умов і режимів функціонування. А наявність зварних чи заклепкових з'єднань елементів їх конструкції несе загрозу появи та розвитку багатоосередкового пошкодження та руйнування, що характеризується раптовим і швидкісним розповсюдженням за рахунок об'єднання між собою та поглинання невеликих за розміром тріщин. Такий характер розвитку пошкоджень, складні умови експлуатації, обмеженість інформації про фактичний технічний стан призводять до багатокласовості об'єктів як у часовому, так і в просторовому вимірах. Для безаварійної та ефективної експлуатації СПО необхідно забезпечити багатокласову діагностику для своєчасного виявлення дефектів, оцінювання їх розмірів, моніторингу їхнього розвитку та взаємодії на значних за розмірами поверхнях об'єктів.

Сучасні системи функціональної діагностики реалізують концепцію структурного моніторингу технічного стану (ТС) об'єкта, що передбачає неперервний та автономний контроль дефектів і пошкоджень, навантажень, взаємодії елементів конструкцій з навколишнім середовищем за допомогою мережі сенсорів, які побудовані на різних фізичних принципах, постійно прикріплені чи вбудовані в конструкцію об'єкта так, щоб забезпечити її цілісність. Процес моніторингу містить процедури отримання, перетворення та аналізу діагностичної інформації з метою визначення (розпізнавання) поточного ТС об'єкта. Якість та ефективність розпізнавання ТС безпосередньо впливає на достовірність багатокласової діагностики в цілому. Для правильного багатокласового розпізнавання ТС необхідний класифікатор, який був би гнучким, забезпечував нелінійне розділення на класи, був чутливим до малих змін діагностичних ознак, міг розрізняти ТС за зміною однієї або декількох діагностичних ознак. Традиційні методи розпізнавання не придатні для побудови такого класифікатора через математичні обмеження аналітичного синтезу. Але такі обмеження частково або повністю знімаються у сучасних технологіях штучного інтелекту – нейронних мережах (НМ), на основі яких можна побудувати класифікатор, ефективний для розпізнавання та класифікації СПО з важко роздільними, нелінійними багатокласовими технічними станами.

Актуальність роботи полягає в науковому обґрунтуванні та вдосконаленні системи функціональної діагностики шляхом розробки нейромережевого класифікатора для багатокласового розпізнавання ТС складного просторового об'єкта зі зварними з'єднаннями елементів конструкцій при появі багатоосередкового пошкодження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до держбюджетних науково-дослідних робіт: «Методологія багатокласової діагностики складних просторових об'єктів» (ДР №0117U004259); «Розробка автоматизованої системи раннього попередження можливості витоку палива на україн-

нській антарктичній станції Академік Вернадський» (ДР №0113U004970); «Розробка підсистем візуалізації та прийняття рішення про стан об'єкта в автоматизованій системі запобігання витокам палива на українській антарктичній станції «Академік Вернадський» (ДР №0117U001689).

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є розробка нейромережевого класифікатора для забезпечення багатокласового розпізнавання технічного стану складного просторового об'єкта зі зварними з'єднаннями елементів конструкцій при появі багатоосередкового пошкодження.

Для досягнення поставленої мети в дисертації вирішуються наступні завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан та тенденції розвитку систем моніторингу складних просторових об'єктів, та обґрунтувати практичне застосування нейронних мереж для багатокласової діагностики.

2. Обґрунтувати загальну структуру вдосконаленої системи функціональної діагностики зварних резервуарів на основі розробки підсистеми прийняття рішення для багатокласового розпізнавання стану резервуару.

3. Розробити загальну структуру нейромережевого класифікатора для багатокласового розпізнавання та обґрунтувати вибір імовірнісної нейронної мережі для його реалізації

4. Розробити та обґрунтувати інформаційні моделі процесів формування навчальних та тестових множин вхідних векторів діагностичних ознак для багатокласового розпізнавання з метою локалізації одиничного та множинного пошкодження, моніторингу розвитку пошкоджень і моніторингу деградації конструкції.

5. Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення для програмної реалізації нейромережевого класифікатора і процесів багатокласового розпізнавання.

6. Провести моделювання та встановити вплив параметрів нейронної мережі та характеристик діагностичних векторів на вірогідність багатокласового розпізнавання стану об'єкта для діагностичних завдань: локалізації пошкодження, моніторинг розвитку пошкоджень, моніторинг деградації конструкції.

7. Провести розпізнавання та дослідити ефективність багатокласового розпізнавання стану зварних резервуарів.

8. Впровадити результати дослідження.

*Об'єктом дослідження* є процес моніторингу та функціональної діагностики складних просторових об'єктів з багатоосередковим пошкодженням.

*Предметом дослідження* є методи та засоби реалізації багатокласового розпізнавання на основі нейронних мереж в системах моніторингу та функціональної діагностики просторових об'єктів з багатоосередковим пошкодженням.

**Методи дослідження:** методи неруйнівного контролю та технічної діагностики, методи обробки сигналів, методи геометричного та імітаційного моделювання, методи розпізнавання, методи теорії імовірності та математичної статистики; за допомогою методів імітаційного моделювання нейронних мереж розроблено програмну реалізацію нейромережевого класифікатора, проведено моделювання процесів багатокласового розпізнавання технічного стану об'єкта.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Для вдосконалення системи моніторингу технічного стану зварного резервуару обґрунтовано та розроблено підсистему прийняття рішення на основі нейромереже-

вого класифікатора для багатокласового розпізнавання стану при появі багатоосередкового пошкодження.

2. Обґрунтовано та розроблено інформаційні моделі процесів формування навчальних і тестових множин діагностичних ознак для таких завдань багатокласового розпізнавання: локалізація одиничного та багатоосередкового пошкодження; моніторинг розвитку одиничного та багатоосередкового пошкодження; моніторинг деградації конструкції об'єкта при розвитку та поширенні пошкоджень.

3. Встановлено залежності вірогідності багатокласового розпізнавання від параметра впливу нейронної мережі для різних значень розмірності навчальних множин, розмірності векторів діагностичних ознак та порядків значень діагностичних ознак для різних класів технічних станів.

**Практична цінність одержаних результатів** полягає в тому, що в роботі розроблено методичне, алгоритмічне та програмне забезпечення практичної реалізації підсистеми прийняття рішення на основі нейромережевого класифікатора та визначено характеристики класифікатора для забезпечення безпомилкового багатокласового розпізнавання технічного стану зварних резервуарів у процесі структурного моніторингу. Зокрема, розроблено функціональну схему системи моніторингу, узагальнену модель підсистеми розпізнавання та нейромережевого класифікатора; встановлено діапазони значень параметра впливу імовірнісної нейронної мережі для забезпечення безпомилкового розпізнавання; розроблено рекомендації щодо розмірності навчальної множини діагностичних векторів, розмірності діагностичних векторів, порядку значень діагностичних ознак для забезпечення високої вірогідності багатокласового розпізнавання. Розроблено алгоритми та комп'ютерні програми для формування навчальних і тестових векторів діагностичних ознак для побудови нейромережевого класифікатора, на які отримано свідоцтва авторського права.

**Особистий внесок здобувача.** Автором самостійно отримано основні положення, які винесені на захист (обґрунтовано та розроблено підсистему прийняття рішення на основі нейромережевого класифікатора для багатокласового розпізнавання стану при появі багатоосередкового пошкодження.; обґрунтовано та розроблено інформаційні моделі процесів формування навчальних і тестових множин діагностичних ознак для локалізації одиничного та багатоосередкового пошкодження, моніторингу розвитку одиничного та багатоосередкового пошкодження, моніторингу деградації конструкції об'єкта при розвитку та поширенні пошкоджень; встановлено залежності вірогідності багатокласового розпізнавання від параметра впливу нейронної мережі для різних значень розмірності навчальних множин, розмірності векторів діагностичних ознак та порядків значень діагностичних ознак для різних класів технічних станів). Самостійно розроблено імітаційні моделі класифікатора, методики досліджень ефективності розпізнавання, алгоритмічне та програмне забезпечення.

У роботах, виконаних у співавторстві, особисто автором виконано: [1] – обґрунтовано розробку підсистеми прийняття рішення, розроблено загальну схему класифікатора, створено його комп'ютерну модель; [2] – розроблено інформаційні моделі процесів формування навчальних і тестових множин вхідних векторів для таких діагностичних завдань: локалізація пошкоджень, моніторинг розвитку пошкоджень, моніторинг деградації конструкції; [3] – проведено багатокласове розпізнавання стану об'єкта, проаналізовано ефективність розробленого класифікатора та обґрунтовано па-

параметри імовірнісної нейронної мережі для достовірної локалізації пошкоджень; [4] – проведено багатокласове розпізнавання стану об'єкта при деградації конструкції, встановлено залежності ефективності розпізнавання від параметру впливу мережі і розмірності навчальної множини діагностичних векторів; [5] – проведено багатокласове розпізнавання стану об'єкта при деградації конструкції за векторами діагностичних ознак різних порядків, проаналізовано ефективність розпізнавання; [6] – проведено багатокласове розпізнавання стану зварного резервуару при розвитку тріщини за зміною напружень в місцях встановлення сенсорів; [10] – побудовано комп'ютерну модель нейромережевого класифікатора, проведено імітаційне моделювання; [11] – проведено імітаційне моделювання та проаналізовано ефективність багатокласового розпізнавання за діагностичними ознаками різних порядків; [12] – обґрунтовано принцип багатокласового розпізнавання складних просторових об'єктів нейромережевим класифікатором; [13] – проведено імітаційне моделювання нейромережевого класифікатора та багатокласове розпізнавання для локалізації одиничного та багатоосередкового пошкодження; [14] – проведено багатокласове розпізнавання технічного стану зварного резервуару для локалізації одиничного пошкодження, визначено інтервал значень параметру впливу мережі для безпомилкового розпізнавання; [7] – обґрунтовано принципи роботи системи; [15] - [22] – розроблено алгоритми та комп'ютерні програми формування множин навчальних та тестових векторів для різних діагностичних завдань багато класового розпізнавання.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на таких конференціях: VIII науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», м. Київ, 2015 р.; 5 науково-практична конференція студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», м. Івано-Франківськ, 2015 р.; III Всеукраїнська науково-технічна конференція «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування», м. Харків, 2016 р.; III Всеукраїнська науково-технічна конференція «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування», м. Тернопіль, 2017 р.; V Міжнародна науково-технічна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування», м. Тернопіль, 2017 р.; 4-а міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017)», м. Вінниця, 2017 р.; XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2018 р.

Проміжні результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Публікації.** За темою дисертаційних досліджень опубліковано 22 наукові праці, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні іноземної держави, 5 статей у виданнях України, з яких 3 включені до міжнародних науково-метричних баз); отримано 1 патент України на корисну модель, 7 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях; 8 свідоцтв авторського права на комп'ютерні програми.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація містить вступ, чотири розділи, загальні висновки по роботі, список використаних джерел із 150 найменувань, 2 додатки. Дисертаційна робота викладена на 201 сторінці, основний зміст роботи

становить 190 сторінок друкованого тексту, в тому числі 41 рисунок і 5 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання досліджень, наведено дані про наукову новизну, практичну цінність та впровадження результатів досліджень, показано зв'язок роботи з науковими програмами й проектами.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку систем функціональної діагностики та моніторингу СПО, обґрунтовано застосування нейронних мереж для багатокласової діагностики таких об'єктів.

Складні просторові об'єкти – це динамічні об'єкти або статичні споруди, що характеризуються великими розмірами конструкцій або елементів, протіканням в них, зазвичай, нестационарних процесів, нелінійними характеристиками, неповнотою контролю зовнішніх впливів, складними, а часто змінними, умовами та режимами функціонування. Такі об'єкти авіаційної техніки, нафтової галузі, об'єкти спеціального призначення відносяться до об'єктів критичної інфраструктури, руйнування яких становить загрозу для навколишнього природного середовища, життя та здоров'я людей. Тому однією з основних характеристик таких об'єктів є здатність зберігати цілісність та незмінність конструкції в експлуатації при впливі на них фізичних та хімічних факторів.

Сучасне проектування елементів конструкцій СПО ґрунтується на принципі безпечного пошкодження, коли наявність в них мікро дефекту розглядається як можливе, але таке, що не призводить до втрати працездатності та руйнування об'єкту. Але в реальних умовах експлуатації є висока ймовірність появи та розвитку багатоосередкового пошкодження в місцях зварних чи заклепкових з'єднань, що обумовлює багатокласовість технічних станів об'єктів (бездефектний стан, стадія зародження однієї і більше тріщин, стадія росту тріщин до критичного розміру, стадія взаємодії та об'єднання тріщин у локальних площинах, стадія взаємодії та критичного об'єднання тріщин, передаварійний стан об'єкта). Для СПО з багатоосередковим пошкодженням багатокласовість станів проявляється як з плином часу (зниження надійності, деградація), так і у просторі (різна локалізація пошкоджень по поверхні, в місцях зварних чи заклепкових з'єднань). Тому для забезпечення надійної та безаварійної експлуатації таких об'єктів необхідним є своєчасне виявлення мікродефектів, оцінювання їх розмірів, моніторинг їхнього розвитку та взаємодії на значних за розмірами поверхнях СПО. Це можливо реалізувати у процесі моніторингу ТС та багатокласової діагностики СПО, що є важливим та актуальним завданням.

Складність та багатокласовість СПО, як об'єкта контролю (ОК), обумовлюють застосування комплексного підходу, коли в одній системі моніторингу об'єднується декілька фізичних принципів та методів контролю. За принципами побудови та функціонування такі системи реалізують концепцію структурного моніторингу ТС – Structural Health Monitoring (SHM). Системи SHM розробляються як розгалужені інформаційні мережі, що подібні до нервової системи людини. Вони забезпечують неперервний та автономний контроль дефектів і пошкоджень, експлуатаційних навантажень, параметрів оточуючого середовища. Як діагностична інформація використовуються

сигнали множини сенсорів, побудованих на різних фізичних принципах, які об'єднуються в єдину інформаційну мережу та інтегровані з обчислювальним та керуючим модулем. Однією з важливих відмінностей систем SHM є впровадження сучасних комп'ютерно-інтегрованих технологій та інтелектуалізація практично всіх етапів моніторингу, зокрема це використання інтелектуальних сенсорів та бездротової передачі даних, багаторівнева обробка діагностичної інформації та оцінювання параметрів поточного ТС за результатами обробки, візуалізація даних вимірювання та аналізу, прийняття рішення про поточний ТС ОК та прогнозування його зміни.

Одним з важливих етапів моніторингу та функціональної діагностики є етап прийняття рішення про поточний ТС об'єкта за результатами вимірювання та обробки діагностичної інформації. Аналіз традиційних методів розпізнавання ТС об'єктів контролю, які мають практичне використання при вирішенні багатьох діагностичних задач, показав що вони є функціонально обмеженими при вирішенні задач розпізнавання ТС, які характеризуються багатокласовістю, нелінійним розділенням на класи, великою розмірністю діагностичних ознак. Однак, за останні десятиліття для побудови систем прийняття рішення було запропоновано різні підходи, що ґрунтуються на використанні експертних систем, нечіткої логіки, штучних нейронних мереж. Зараз системи на основі НМ використовуються для вирішення задач класифікації, кластеризації, прогнозування та розпізнавання образів, зокрема є гнучким ефективним інструментом для розпізнавання класів ТС, які не розділяються лінійно у просторі ознак. Враховуючи здатність НМ виконувати недоступні для традиційної математики операції обробки, порівняння, класифікації образів, можливість самонавчання та самоорганізації, їх використання в системах моніторингу та функціональної діагностики дозволяє створювати потужні інтелектуальні системи, що відповідають концепції SHM.

Аналіз публікацій за темою дисертації показав, що і вітчизняні, і закордонні дослідники використовують різні методи штучного інтелекту та пропонують системи розпізнавання на основі використання різних типів НМ. Але, в загальному випадку, розглянуті роботи присвячені вирішенню задачі двокласової діагностики, коли встановлюється факт відсутності чи наявності пошкодження, або визначається тип пошкодження з двох можливих. Часто в дослідженнях НМ налаштовується на конкретний тип пошкодження чи його розмір, або застосовується для класифікації при зміні одного діагностичного параметра. Але в наявних публікаціях завдання багатокласового розпізнавання технічного стану СПО при багатоосередковому пошкодженні залишаються не вирішеними та недостатньо дослідженими. Таким чином, хоча результати раніше виконаних досліджень і демонструють необхідність і ефективність застосування НМ в комплексних інтелектуальних системах моніторингу, але не містять методичного та алгоритмічного забезпечення, рекомендацій щодо характеристик НМ та розроблених на їх основі класифікаторів для забезпечення високої вірогідності багатокласового розпізнавання ТС при вирішенні різних діагностичних завдань у процесі моніторингу СПО при появі та розвитку багатоосередкового пошкодження. Тому наявні дослідження не дозволяють розв'язати актуальне завдання вдосконалення системи функціональної діагностики для забезпечення надійної безаварійної експлуатації СПО.

Проведений аналіз дозволив сформулювати наведені вище мету та задачі дисертаційної роботи та обрати відповідні їм методи досліджень.



**Другий розділ** присвячено структурно-функціональному синтезу нейромережевого класифікатора ТС для багатокласової діагностики СПО.

Як об'єкт контролю розглядається зварний паливний резервуар з еколого-небезпечними речовинами, який експлуатується в критичних умовах – у важкодоступних місцях за впливу навантажень, які часто перевищують розраховані значення, та який характеризується максимально жорсткими умовами щодо збереження цілісності.

В дисертації розглянуто загально-технічні вимоги, які висуваються до систем функціональної діагностики резервуарів для забезпечення їх структурної цілісності. Наведено загальний підхід до розробки багатоканальних систем моніторингу ТС резервуарів на основі концепції SHM.

В дисертації обґрунтовано, розроблено та запатентовано систему функціональної діагностики резервуару зі зварними з'єднаннями для моніторингу ТС резервуару при появі багато осередкового пошкодження. Для вдосконалення системи моніторингу технічного стану зварного резервуару в дисертації обґрунтовано та розроблено підсистему прийняття рішення на основі нейромережевого класифікатора для багатокласового розпізнавання стану при появі багатоосередкового пошкодження.

Узагальнену функціональну схему системи функціональної діагностики резервуару наведено на рис. 1.



Рис. 1. Узагальнена схема системи функціональної діагностики резервуарів

Складовими цієї системи є: БПП – блок первинних перетворювачів, що містить блоки акселерометрів (БА), тензорезисторів (БТ) та інклінометрів (БІ); АЦП – аналого-цифровий перетворювач; 1 – блок попередньої обробки; 2 – блок отримання зовнішніх даних; 3 – блок збереження даних; 4, 5, 6 – блоки обробки вібраційних, тензометричних та інклінометричних даних, відповідно; 7 – блок формування діагностичних ознак; 8 – блок збереження даних візуалізації; 9 – блок прогнозу; 10 – блок графічного відображення даних; НМК – нейромережевий класифікатор; 11 – блок вхідних

тестових множин; 12 – блок вхідних навчальних множин; 13 – блок прийняття рішення; 14 – пристрій аварійної сигналізації.

Для визначення поточного ТС об'єкту та його прогнозування використовуються дані з мережі сенсорів (БПП), які після перетворення у цифровий сигнал за допомогою АЦП, надходять до блоку попередньої обробки, де додатково враховуються вимірювані в 2 впливи зовнішнього середовища на об'єкт. Оброблені дані записуючим пристроєм зберігаються у файл. Далі діагностична інформація розподіляється у відповідності до фізичних процесів між блоками обробки вібраційних, тензометричних та інклінометричних даних 4-6. Вихідна інформація надходить до блоку збереження даних візуалізації 8 та блоку формування діагностичних ознак 7, в якому виділяються складові сигналів та розраховуються діагностичні ознаки, до яких можуть відноситись спектральні, кореляційні, фрактальні, статистичні характеристики вимірюваних сигналів, тощо. За отриманими діагностичними ознаками нейромережевий класифікатор (НМК) виконує багатокласове розпізнавання стану об'єкту для конкретного заданого діагностичного завдання. Для побудови НМК використовуються множини навчальних образів (з блоку 12) та множини тестових образів (з блоку 11). Відповідно до результатів багатокласового розпізнавання в блоці 13 приймається рішення щодо ТС ОК, яке графічно відображається для обслуговуючого персоналу. Сповіщення щодо ТС також може бути виконано за допомогою пристрою 14 аварійної сигналізації у разі небезпеки.

В дисертації обґрунтовано використання імовірнісної нейронної мережі (ІНМ) для розробки НМК, як такої, що має переваги у швидкості та легкості навчання, забезпечує найкращі результати у разі складної нелінійної роздільності між класами технічних станів у просторі діагностичних ознак, має можливість змінювати параметр впливу мережі під час навчання та тестування для досягнення максимально можливих значень вірогідності розпізнавання. На основі ІНМ розроблено загальну структуру класифікатора (рис. 2), елементами якого є: навчальна множина образів або діагностичних ознак (вектор  $P$ ); множина цільових класів  $S_k$  (вектор  $T$ ); матриця зв'язності  $T_c$ , яка встановлює приналежність вхідних векторів до відповідних класів  $S_k$ ; нейронна мережа, яка виконує процес класифікації та розпізнавання ТС об'єкта; тестова множина образів (вектор  $P_{test}$ ).

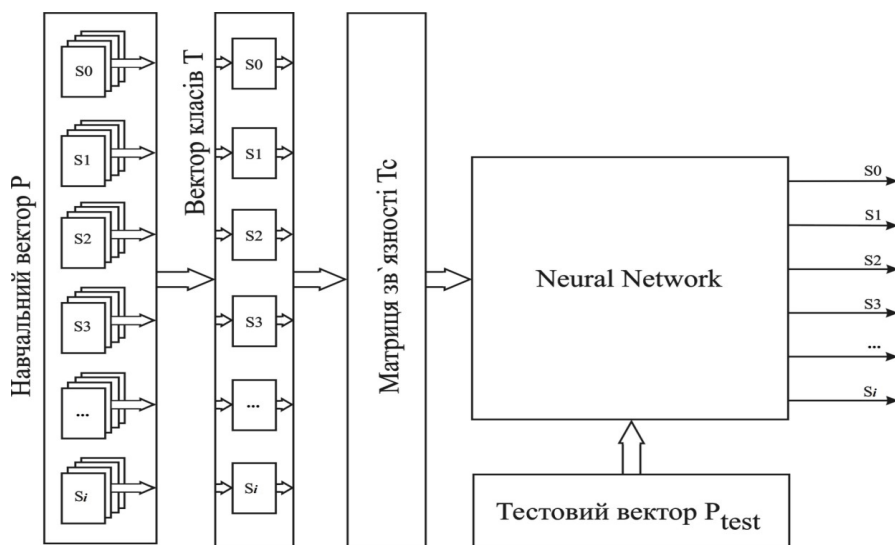


Рис. 2. Загальна структура нейромережевого класифікатора для багатокласового розпізнавання на основі імовірнісної нейронної мережі

Для проведення розпізнавання ТС необхідно сформувати вхідні багатовимірні вектори діагностичних ознак за результатами аналізу діагностичної інформації з множини просторово рознесених сенсорів, місця встановлення яких визначаються в результаті дослідження резервуару, як об'єкта контролю. У загальному випадку класифікатор відносить об'єкт до одного з визначених класів функціонального стану, які розділяються за наявністю, розмірністю та локалізацією пошкоджень. В дисертаційній роботі запропоновано виконувати багатокласове розпізнавання ТС резервуару для таких діагностичних завдань: локалізація одиничного та багатоосередкового пошкодження; моніторинг розвитку пошкодження; моніторинг деградації конструкції при розвитку та поширенні пошкоджень.

Пов'яжемо з координатами місця закріплення кожного  $i$ -го сенсора діагностичну ознаку  $a_i$  ( $i = 1 \dots n$ ), яка визначається в результаті обробки вимірюваного сигналу і є характеристикою об'єкта в певній точці прийняття інформації. Кількість ознак  $n$  може варіюватися в залежності від кількості вимірювальних каналів. Для багатокласового розпізнавання використовуємо  $n$ -вимірний вектор діагностичних ознак:

$$A = (a_1 \ a_2 \dots a_n)^T$$

Для усіх діагностичних завдань визначаємо клас  $S_0$ , що характеризує бездефектний стан, як такий, коли відхилення всіх діагностичних ознак у векторі знаходяться у встановлених межах ( $\pm \Delta_0$ ). Перевищення значення допустимого відхилення однією чи декількома будь-якими ознаками свідчить про перехід технічного стану об'єкта з класу  $S_0$  до класів  $S_i$ , які характеризують дефектний стан об'єкта.

В дисертації обґрунтовано та розроблено інформаційні моделі процесів формування навчальних і тестових множин діагностичних ознак для визначених вище діагностичних завдань. На рис. 3 наведено інформаційну модель процесу формування навчальної та тестової множин вхідних векторів діагностичних ознак для багатокласового розпізнавання з метою локалізації одиничного пошкодження.

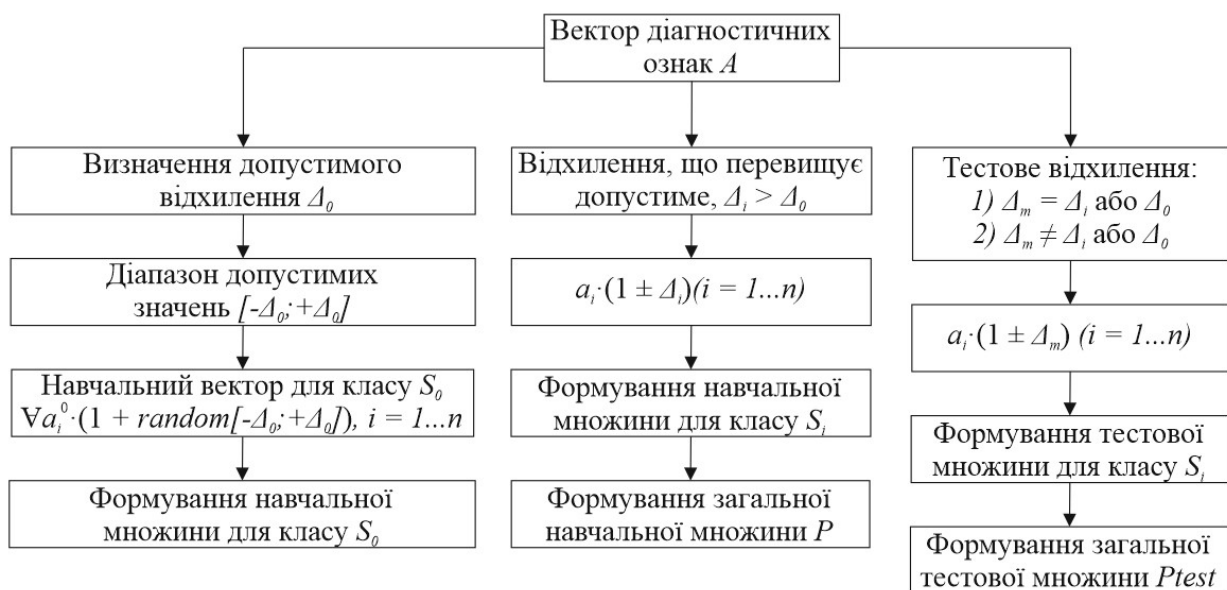


Рис. 3. Інформаційна модель процесу формування навчальної та тестової множин вхідних векторів діагностичних ознак для багатокласового розпізнавання з метою локалізації одиничного пошкодження

Вважаємо, що поява одиничного пошкодження призводить до змінювання значення будь-якої однієї ознаки. Місце появи будемо визначати за номером діагностичної ознаки у векторі, відхилення значення якої перевищує допустиме встановлене  $\Delta_0$ .

Для локалізації багатоосередкового пошкодження (на прикладі 2х ознак) вважаємо, що одночасна поява двох пошкоджень призводить до змінювання у діагностичному векторі значень будь-яких двох ознак. Результат класифікації – це визначення класу  $S_{ij}$ , для якого встановлено перевищення значень будь-яких двох ознак у векторі  $A$ . Інформаційна модель будується за таким самим принципом, як і для локалізації одиничного пошкодження.

На рис. 4 наведено інформаційну модель процесу формування навчальної та тестової множин вхідних векторів діагностичних ознак для багатокласового розпізнавання з метою моніторингу розвитку пошкодження.

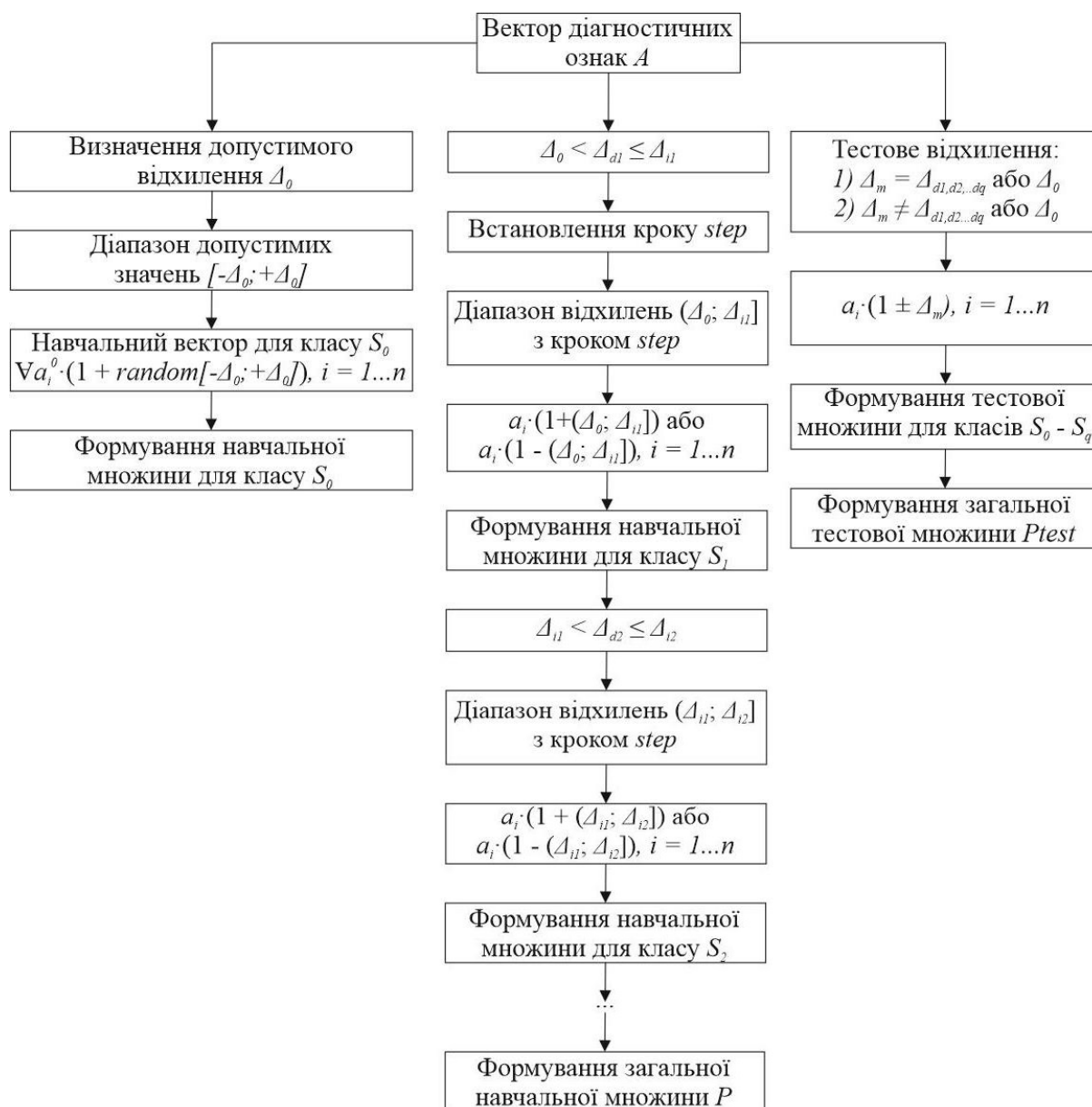


Рис. 4. Інформаційна модель процесу формування навчальної та тестової множин вхідних векторів діагностичних ознак для багатокласового розпізнавання з метою моніторингу розвитку пошкодження

Задача моніторингу розвитку пошкодження пов'язується з локалізацією пошкодження, коли у випадку його виявлення у місці, з яким пов'язана діагностична ознака  $a_i$ , може бути застосований моніторинг зміни відхилення  $\Delta_i$  цієї ознаки з часом у встановлених межах. Тому результат класифікації встановлює клас дефектного стану об'єкта, який вказує на інтервал значень відхилення діагностичної ознаки.

На рис. 5 наведено інформаційну модель процесу формування навчальної та тестової множин вхідних векторів діагностичних ознак для багатокласового розпізнавання з метою моніторингу деградації конструкції.

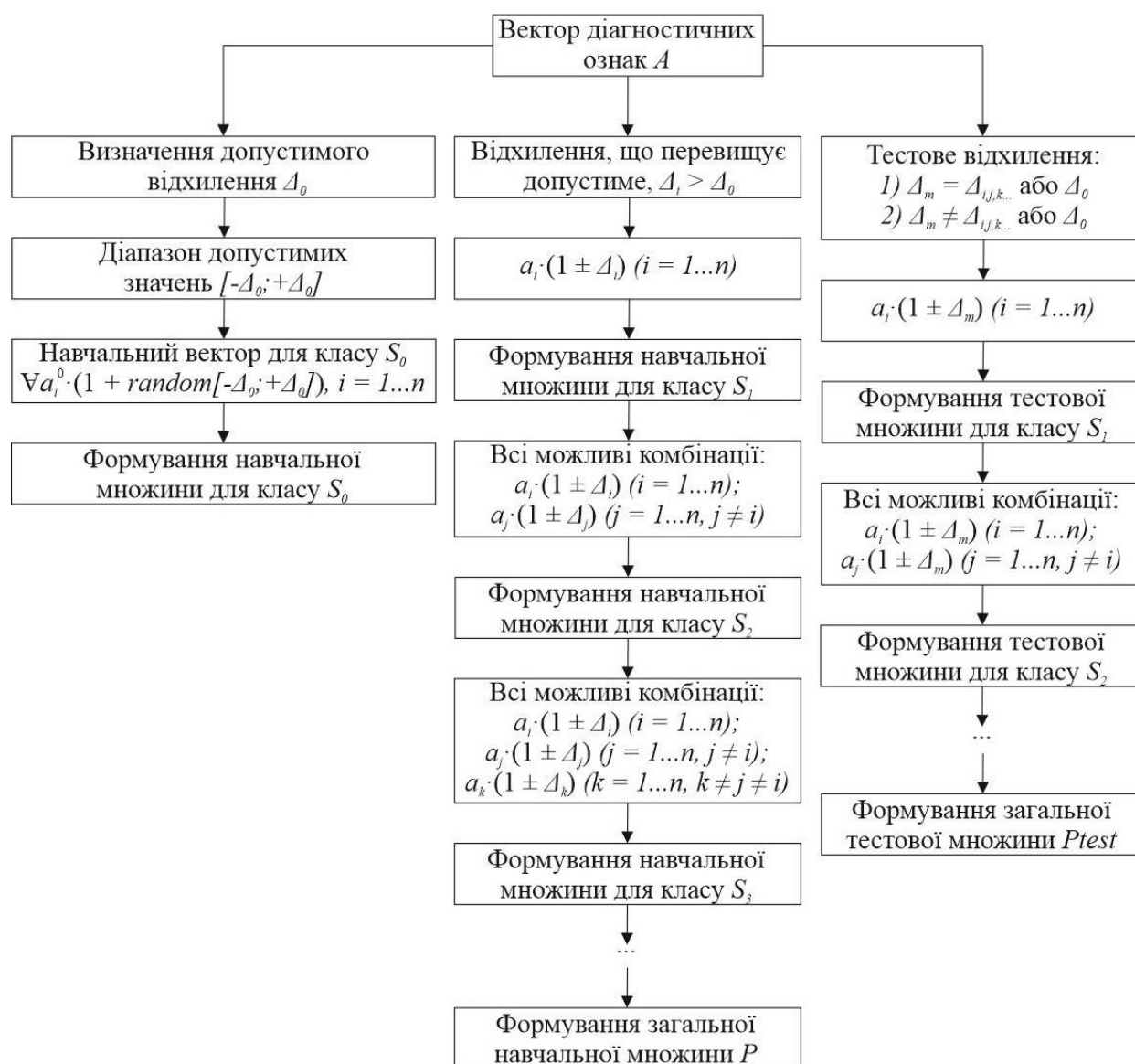


Рис. 5. Інформаційна модель процесу формування навчальної та тестової множин вхідних векторів діагностичних ознак для багатокласового розпізнавання з метою моніторингу деградації конструкції

Деградація конструкції – це процес одночасної появи та розвитку пошкоджень в різних місцях об'єкту, дефектні класи встановлюються як такі, що характеризуються перевищенням допустимого відхилення однією, одночасно двома, одночасно трьома і т.д. ознаками у діагностичному векторі. Результатом класифікації є розпізнавання одного з можливого технічного стану за встановленим класами.

Таким чином, в дисертації обґрунтовано та розроблено інформаційні моделі за якими будуть формуватися навчальні та тестові множини діагностичних ознак для багатокласового розпізнавання при вирішенні діагностичних завдань локалізації та моніторингу розвитку пошкоджень, моніторингу деградації конструкції. Розроблено алгоритмічне програмне забезпечення для розроблених інформаційних моделей. На основі об'єднання розглянутих діагностичних завдань в дисертації розроблено узагальнену структуру багатокласового розпізнавання.

**У третьому розділі** проведено моделювання процесу багатокласового розпізнавання нейромережним класифікатором за визначеними діагностичними завданнями, за результатами якого встановлено залежності вірогідності розпізнавання від параметрів розробленого класифікатора.

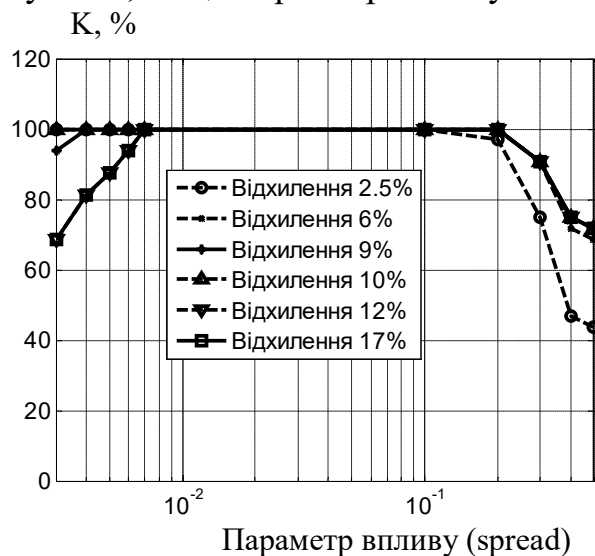
В дисертації виконано програмну реалізацію НМК на основі ІНМ в середовищі Matlab. В структуру ІНМ покладена архітектура радіально-базисної мережі, яка складається з двох шарів. Нейрони першого шару мають радіально-базисні функції активації, кількість нейронів шару залежить від кількості навчальних векторів. Другий шар називається шаром конкуренції, він підраховує імовірність приналежності вхідного вектору до того чи іншого класу та зіставляє вхідний вектор з тим класом, імовірність приналежності до якого вище. Кількість нейронів цього шару визначається кількістю класів ТС. В результаті обчислюється імовірність приналежності вхідного вектору до класу, а потім обирається клас з найбільшою ймовірністю. Точність класифікації залежить від параметру впливу ІНМ - *spread*. Цей параметр відповідає  $\sigma^2$  в Гаусівському розподілі, він встановлює перекриття радіально-базисних функцій і впливає на похибку навчання та результат розпізнавання. Параметр впливу визначається експериментальним шляхом у процесі навчання та тестування класифікатора як такий, за якого досягається максимально можливе значення вірогідності розпізнавання.

Для моделювання процесу багато класового розпізнавання використано вектор діагностичних ознак, який містить 5 складових. Значення ознак знаходяться в межах діапазону  $[1 \dots 10]$ . Встановлено допустиме відхилення  $\Delta_0 = 5\%$ . Сформовано навчальні і тестові множини вхідних векторів для вирішення вище зазначених діагностичних задач відповідно до розроблених у розділі 2 інформаційних моделей.

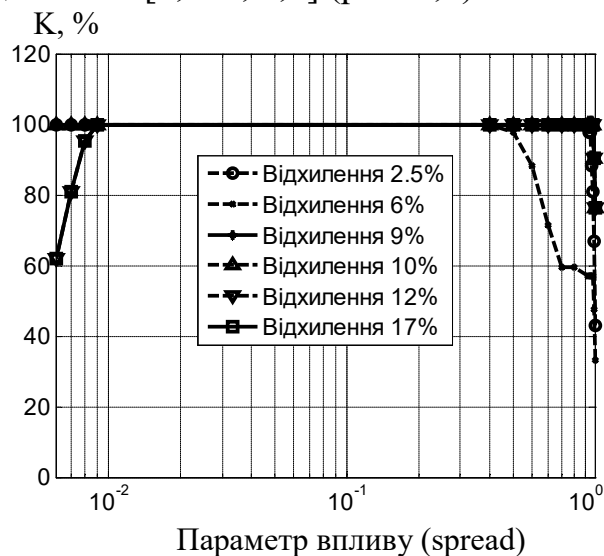
Розпізнавання проводилось для різних значень параметру впливу мережі *spread* для визначення його впливу на ефективність багатокласового розпізнавання. Ефективність розпізнавання оцінюється за значенням вірогідності розпізнавання  $K$ , яке визначалось у відсотках як відношення кількості векторів  $N_1$ , які правильно класифікуються, до загальної кількості вхідних векторів  $N_0$ . В результаті кожного модельного експерименту було отримано залежності вірогідності розпізнавання від показника впливу, які дозволяють вибрати інтервал значень параметра впливу *spread* для забезпечення максимально можливого значення  $K$ .

Проведено розпізнавання ТС ОК для локалізації одиничного пошкодження (розпізнавання шести класів ТС, використано 66 навчальних та 34 тестових векторів), та для локалізації багатоосередкового пошкодження на прикладі одночасної появи двох пошкоджень (розпізнавання 11 класів ТС, використано 126 навчальних векторів та 142 тестових вектора). На рис. 6 наведено графіки залежності показника  $K$  від значень параметра впливу *spread* для локалізації одиничного та багатоосередкового пошкодження. Встановлено, що для першого завдання розроблений класифікатор забезпечує без-

помилкове розпізнавання ТС об'єкта, якщо значення параметра впливу знаходяться в діапазоні  $[0,007; 0,1]$  (рис. 6,а) для всієї множини попередньо визначених вхідних векторів і класів. Для локалізації двох пошкоджень безпомилкове розпізнавання забезпечується, якщо параметр впливу знаходиться в діапазоні  $[0,009; 0,4]$  (рис. 6,б).



а)



б)

Рис. 6. Графіки залежності вірогідності розпізнавання від параметру впливу *spread* для діагностичних завдань: а) локалізація однічного пошкодження; б) локалізація багатоосередкового пошкодження (на прикладі двох пошкоджень)

Як видно, існує один і той же інтервал значень параметра впливу, в якому забезпечується безпомилкове розпізнавання при локалізації одного та двох пошкоджень.

Проведено багатокласове розпізнавання для моніторингу розвитку пошкодження (розпізнавання шести класів, використано 58 навчальних векторів і 42 тестових вектора), та для моніторингу деградації конструкції (розпізнавання шести класів, використано 378 навчальних векторів і 252 тестових вектора). Графіки залежності вірогідності розпізнавання від параметру впливу для зазначених діагностичних завдань наведено відповідно на рис. 7 та рис. 8.

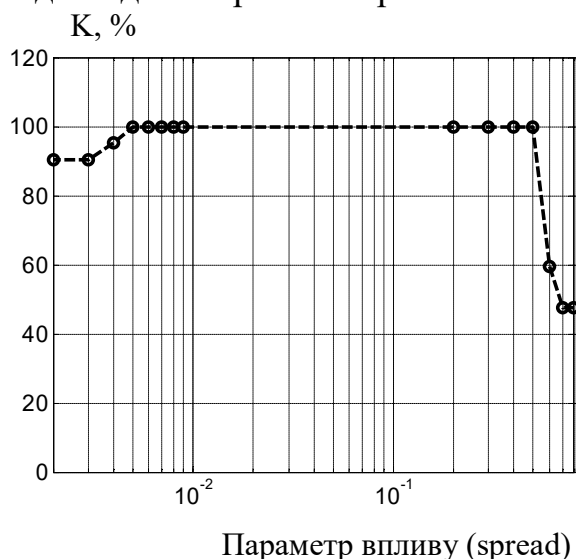


Рис. 7. Графіки залежності вірогідності розпізнавання від параметру впливу при моніторингу розвитку пошкодження

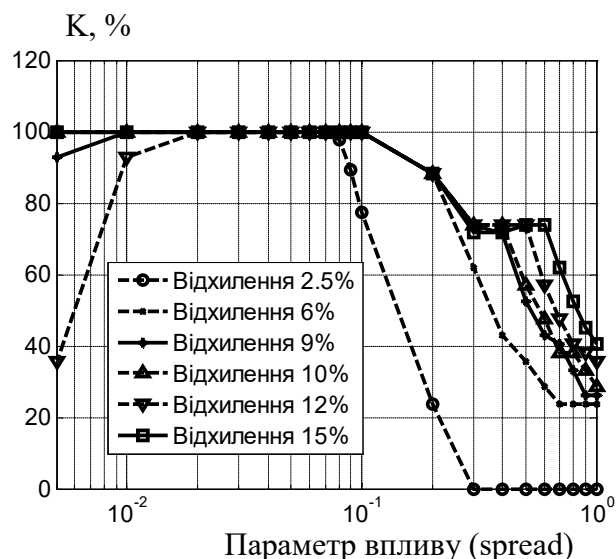


Рис. 8. Графіки залежності вірогідності розпізнавання від параметру впливу при моніторингу деградації конструкції

Встановлено, що безпомилкове розпізнавання при моніторингу розвитку пошкодження досягається, якщо значення параметру впливу *spread* лежить в діапазоні  $[0,005; 0,5]$ . Для моніторингу деградації конструкції, як найбільш небезпечного прояву багатоосередкового пошкодження, встановлено, що безпомилкове багатокласове розпізнавання технічного стану об'єкта досягається розробленим класифікатором при значеннях параметра впливу *spread* в діапазоні  $[0,02; 0,07]$  по всій множині вхідних векторів з різними значеннями відхилення елементів ознак.

Оскільки моніторинг деградації конструкції є найбільш загальним випадком, який поєднує і локалізацію, і моніторинг розвитку пошкодження, то на ньому було досліджено вплив інших факторів на ефективність багатокласового розпізнавання.

Проведено дослідження впливу кількості навчальних векторів на ефективність розпізнавання. Розмір радіально-базисного шару ІНМ залежить від розмірності навчальної множини. Чим більший розмір ІНМ, тим довший час навчання мережі, що негативно впливає на швидкість функціонування класифікатора в режимі реального часу. З іншого боку – зменшення кількості навчальних векторів може призвести до зниження ефективності розпізнавання. Встановлено залежності вірогідності розпізнавання від розмірності множини навчальних векторів (рис. 9), які показують, що безпомилкова класифікація не досягається при зменшенні кількості навчальних векторів, якщо відхилення діагностичних ознак перевищує 17 %.

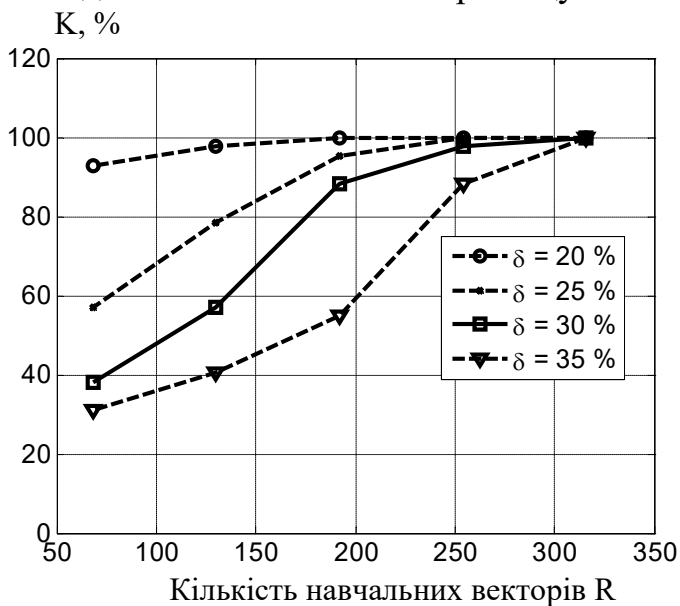


Рис. 9. Графіки залежності вірогідності розпізнавання від кількості навчальних векторів

В результаті досліджень встановлено, що ефективність класифікатора зменшується, якщо діагностичні ознаки у векторі мають значення різних порядків, безпомилкове розпізнавання забезпечується для діагностичних ознак одного порядку. Це обумовлює необхідність перетворення чи нормалізації діагностичних ознак, в іншому випадку для векторів діагностичних ознак різних порядків необхідно мати окремо налаштований класифікатор для забезпечення безпомилкового розпізнавання ТС.

Проведено дослідження впливу кількості діагностичних ознак у векторах на ефективність розпізнавання, яке показало, що збільшення кількості діагностичних

Застосування різних методів обробки інформації для виділення діагностичних ознак може призвести до суттєвої різниці їх значень, які можуть знаходитись в межах декількох порядків. Тому в роботі проведено дослідження впливу різного порядку значень діагностичних ознак у векторі на ефективність розпізнавання. Розглянуто такі інтервали значень діагностичних ознак  $a_i$  для моніторингу деградації конструкції: 1) від 1 до 10 (результати було наведено на рис. 8); 2) від 0 до 1; 3) від 0 до 10; 4) від 10 до 100; 5) від 1 до 100. Графіки залежності вірогідності розпізнавання від параметру впливу *spread* для інтервалів 2-5 значень діагностичних ознак наведено на рис. 10.



ознак у векторах (наприклад, з 5 до 7) ускладнює структуру ІНМ та процес формування навчальних і тестових множин вхідних векторів, при цьому знижується вірогідність розпізнавання ТС та звужується діапазон значень параметру впливу.

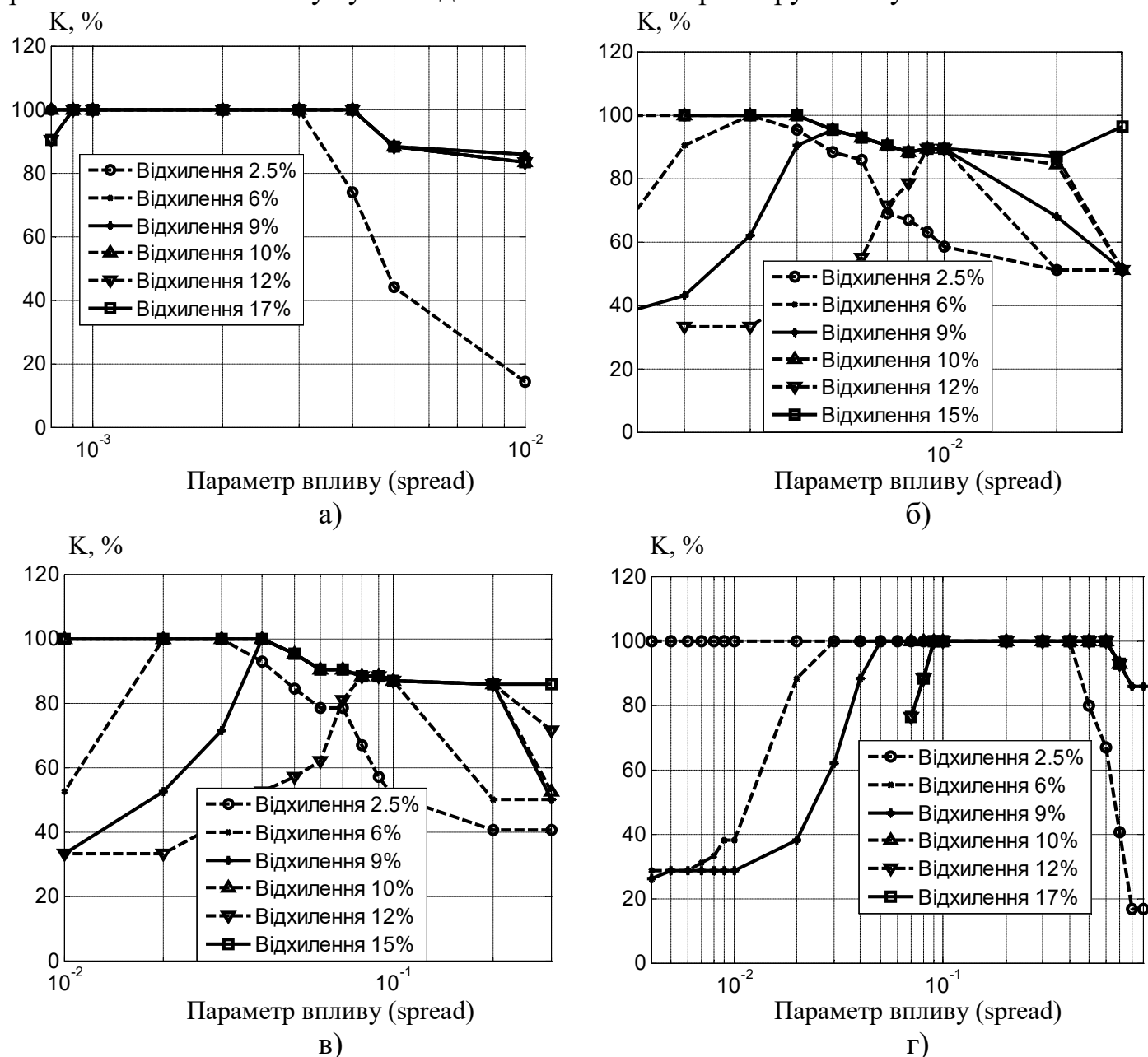


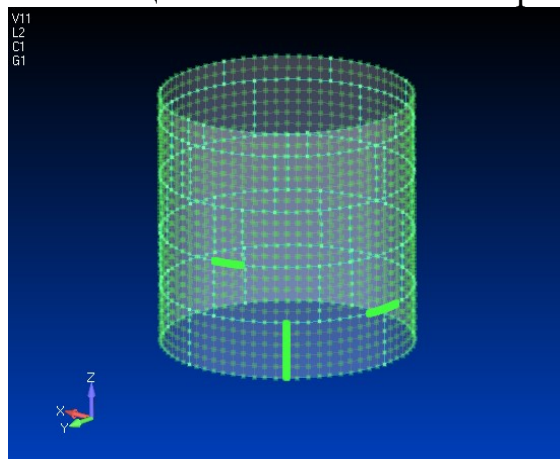
Рис. 10. Графіка залежності вірогідності розпізнавання від параметру впливу *spread* для інтервалів значень діагностичних ознак: а) від 0 до 1; б) від 0 до 10; в) від 1 до 100; г) від 10 до 100

Таким чином, встановлено залежності вірогідності багатокласового розпізнавання від параметра впливу нейронної мережі для різних значень розмірності навчальних множин, розмірності векторів діагностичних ознак та порядків значень діагностичних ознак для різних класів технічних станів.

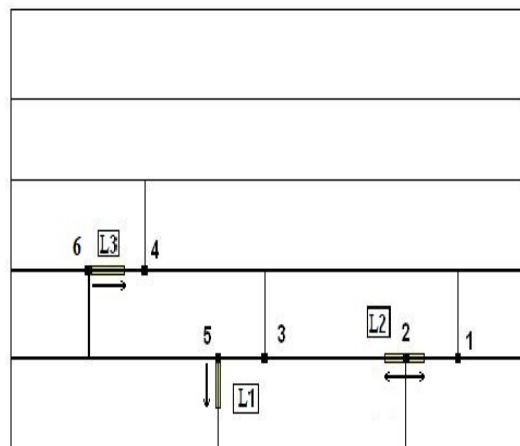
У четвертому розділі проведено аналіз ефективності багатокласового розпізнавання розробленим класифікатором ТС резервуару за результатами дослідження його комп'ютерної та фізичної моделей.

Проведено моделювання напружено-деформованого стану комп'ютерної моделі зварного резервуару з трьома тріщинами ( $L_1, L_2, L_3$ ) в зварних швах (рис. 11), які знахо-

дяться у різних поясах оболонки. Розглянуто випадки появи та розвитку однієї тріщини ( $L_1, L_2$  чи  $L_3$ ), одночасної появи та розвитку двох та трьох тріщин. В результаті визначено вплив появи та розвитку одиничного та багатоосередкового пошкодження (тріщин) на напруження в можливих місцях встановлення сенсорів, результати наведено в табл. 1 - табл. 3 (через  $\Delta l / l$  позначено відносний розмір тріщини). Сформовано багатовимірні вектори діагностичних ознак для завдань локалізації та моніторингу пошкоджень, як діагностичні ознаки використано значення максимальних напружень в можливих місцях встановлення сенсорів.



а)



б)

Рис. 11. Результати моделювання зварного резервуару з пошкодженнями: а) дискретна модель з тріщинами; б) схема розташування та розвитку тріщин і можливих місць встановлення сенсорів

Проведено багатокласове розпізнавання стану ОК для локалізації одиничного пошкодження за даними сенсорів напружень (табл. 1), в результаті якого встановлено, що безпомилкове багатокласове розпізнавання стану об'єкту розробленим класифікатором досягається при параметрі впливу *spread* в діапазоні  $[8 \cdot 10^{-5}; 10^{-2}]$  для вирішення задачі локалізації одиничних пошкоджень  $L_1, L_2$  чи  $L_3$ .

Таблиця 1. Значення напружень в стінці резервуару в місцях розташування сенсорів

Напруження в стінці резервуару з дефектами, МПа				
№ п/п сенсорів	$\Delta l / l = 0 \%$	$\Delta l / l = 5 \%$		
		$L_1$	$L_2$	$L_3$
1	0,62116	0,62116	0,62121	0,62116
2	1,30410	1,30410	0,90778	1,30410
3	0,59157	0,59155	0,59162	0,59151
4	0,71968	0,71981	0,71975	0,70582
5	0,76733	0,83244	0,76725	0,76712
6	0,66661	0,66674	0,66683	1,25081

Проведено багатокласове розпізнавання стану ОК для локалізації багатоосередкового пошкодження для випадків одночасної появи однієї, двох та трьох тріщин за даними сенсорів напружень (табл. 1, табл. 2). Встановлено, що безпомилкове багатокласове розпізнавання стану об'єкту розробленим класифікатором досягається, якщо параметр впливу *spread* знаходиться в діапазоні значень  $[0,002; 0,1]$ .

Таблиця 2. Значення напружень в стінці резервуару в місцях розташування сенсорів при одночасній появі тріщин  $L_1+L_2$  та  $L_1+L_2+L_3$

№ п/п сенсорів	Напруження в стінці резервуару з дефектами, МПа	
	Поява $L_1+L_2$	Поява $L_1+L_2+L_3$
1	0,62142	0,62146
2	0,81758	0,81750
3	0,60238	0,60234
4	0,72340	0,72420
5	0,83219	0,83215
6	0,66688	1,25094

Таблиця 3. Значення напружень в стінці резервуару в місцях розташування сенсорів при появі та розвитку тріщини  $L_1$

№ п/п сенсорів	Напруження в стінці резервуару з дефектами, МПа		
	$\Delta l_1 / l_1 = 0,1$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,2$	$\Delta l_1 / l_1 = 0,5$
1	0,62141	0,62145	0,62182
2	1,09380	1,09400	1,09460
3	0,60189	0,60268	0,59856
4	0,69143	0,69121	0,69117
5	0,97446	1,19560	1,46780
6	0,82045	0,82080	1,45710

Проведено багатокласове розпізнавання стану ОК для моніторингу розвитку пошкодження для тріщини  $L_1$  за даними сенсорів напружень (табл. 1 – табл. 2). Встановлено, що безпомилкове багатокласове розпізнавання розробленим класифікатором досягається при параметрі впливу *spread* в діапазоні  $[0,007; 0,09]$ .

Проведено багатокласове розпізнавання ТС резервуару за результатами вібраційних досліджень його фізичної моделі. В якості фізичної моделі резервуара був використаний вертикальний сталевий резервуар циліндричної форми об'ємом  $0,04 \text{ м}^3$ . Функціональний стан резервуару задавався різним рівнем наповненості резервуару рідиною. Дослідження фізичної моделі проведено за методом вільних коливань, для обробки імпульсних відкликів використано спектральний та фрактальний аналіз. Як діагностичні ознаки використано показник Херста та значення нормованих частот вільних коливань фізичної моделі для різного рівня наповненості. Оброблено більше ніж 50 вибірок даних при різному статичному навантаженні від дії рідини на стінки резервуара. Відповідно для кожної точки вимірювання при відповідних рівнях наповненості було визначено середнє значення показника Херста та нормовані по частоті дискретизації дві домінуючі частоти складових коливань, значення яких наведено в табл. 4.

Розпізнавались 5 класів функціонального стану фізичної моделі резервуару, які визначались за його рівнем наповнення: порожній (0%); 25%; 50%; 75%; повністю заповнений (100%). Багатокласове розпізнавання розробленим класифікатором стану виконано для трьох випадків навчання: на початкових значеннях нормованих частот; на усереднених значеннях нормованих частот; на нормованих частотах з проміжку їх значень. Результати наведено на рис. 12.

Таблиця 4. Результати обробки вібраційних сигналів

Стан наповненості резервуару	0	25 %	50 %	70 %	100 %
Показник Херста	0,4835	0,4602	0,4467	0,4442	0,3956
Нормована частота 1	0,2225	0,238	0,222	0,2325	0,2245
Нормована частота 2	0,17	0,177	0,1635	0,1835	0,1685

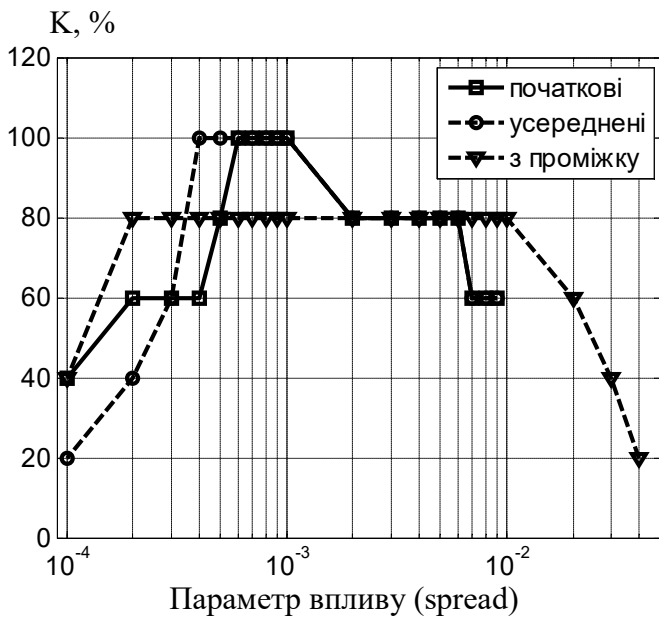


Рис. 12. Графік залежності вірогідності розпізнавання від параметру впливу  $spread$

класового розпізнавання, найкращі результати досягаються для випадку, коли в якості навчальних значень приведених частот для діагностичних ознак використовуються початкові значення, при 100 % наповненості резервуару.

Проведені дослідження підтверджують ефективність розробленого нейромережевого класифікатора для розв'язання різних завдань багато класового розпізнавання. Результати показали важливість правильного вибору методу навчання ІНМ та значень діагностичних ознак для навчальних і тестових векторів для досягнення максимальних значень вірогідності розпізнавання.

У додатках наведено акти про впровадження результатів дисертаційної роботи, список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача наукового обґрунтування та розробки нейромережевого класифікатора для забезпечення багатокласового розпізнавання технічного стану складного просторового об'єкта зі зварними з'єднаннями елементів конструкцій при появі багатоосередкового пошкодження.

1. Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку систем функціональної діагностики складних просторових об'єктів авіаційної техніки, нафто-газо-транспортної галузі, енергетики, будівель та інженерних споруд різного призначення показав, що основним експлуатаційним фактором їх безпечного функціонування є розробка та впровадження систем функціональної діагностики нового класу – комплексних інтелектуалізованих систем моніторингу на основі концепції Structural Health Monitoring. Показано, що одним з напрямків вдосконалення таких систем є використання штучних нейронних мереж для забезпечення багатокласової діагностики складних просторових об'єктів при появі багатоосередкового пошкодження.

Як видно, безпомилкове багатокласове розпізнавання досягається, якщо значення  $spread$  знаходиться в діапазоні від  $6 \cdot 10^{-4}$  до  $10^{-3}$  при навчанні на початкових значеннях нормованих частот.

При навчанні на усереднених значеннях нормованих частот, безпомилкове багатокласове розпізнавання досягається для значень  $spread$  від  $4 \cdot 10^{-4}$  до  $10^{-3}$ .

Якщо навчання класифікатора проводити на нормованих частотах, що змінюються в діапазоні своїх значень, то безпомилкове розпізнавання не досягається, максимальне значення вірогідності розпізнавання не перевищує 0,8 ( $K=80\%$ ).

Порівнюючи різні підходи для формування навчальних векторів для багато-

2. Розроблено та обґрунтовано загальну структуру та принцип функціонування вдосконаленої системи функціональної діагностики зварних резервуарів, яка містить розроблену підсистему прийняття рішення на основі нейромережевого класифікатора для багатокласового розпізнавання стану резервуару.

3. Для побудови класифікатора обґрунтовано використання імовірнісної нейронної мережі, як такої, що забезпечує нелінійне розділення на класи простору діагностичних ознак та має можливість у процесі тестування змінювати параметр впливу мережі для забезпечення максимально можливого значення вірогідності розпізнавання. Розроблено та обґрунтовано загальну структуру нейромережевого класифікатора для багатокласового розпізнавання стану зварного резервуару при вирішенні таких діагностичних завдань: локалізація одиничного та багато осередкового пошкодження; моніторинг розвитку пошкодження; моніторинг деградації конструкції. До складу нейромережевого класифікатора входять: імовірнісна нейронна мережа; навчальна множина багатовимірних векторів діагностичних ознак; множина класів технічного стану об'єкту; матриця, що пов'язує вектори навчальної множини з відповідними класами технічного стану; тестова множина багатовимірних векторів діагностичних ознак.

4. Для кожного діагностичного завдання багатокласового розпізнавання обґрунтовано класи технічних станів об'єкта та розроблено інформаційні моделі процесів формування навчальних та тестових множин багатовимірних векторів діагностичних ознак, які характеризують бездефектний та дефектні класи технічного стану об'єкта. Розроблено трирівневу структуру процесу багато класового розпізнавання технічного стану об'єкта, в якій діагностичні завдання розділені та вирішуються послідовно від визначення наявності та локалізації одиничного пошкодження до моніторингу деградації конструкції.

5. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для програмної реалізації нейромережевого класифікатора та процесів багатокласового розпізнавання для локалізації пошкоджень, моніторингу розвитку пошкодження та моніторингу деградації конструкції.

6. Проведено моделювання процесів багатокласового розпізнавання розробленим класифікатором стану об'єкта для діагностичних завдань локалізації пошкоджень, моніторингу розвитку пошкодження та моніторингу деградації конструкції. Встановлено залежності вірогідності багатокласового розпізнавання від параметра впливу нейронної мережі для різних значень розмірності навчальних множин, розмірності векторів діагностичних ознак та порядків значень діагностичних ознак для різних класів технічних станів. Аналіз встановлених залежностей показав, що:

- для кожного діагностичного завдання існує діапазон значень параметра впливу нейронної мережі, в якому класифікатор забезпечує безпомилкове розпізнавання стану;
- зменшення розмірності навчальної множини діагностичних векторів призводить до зменшення вірогідності розпізнавання, якщо відхилення значень діагностичних ознак для дефектних класів перевищує 17%;
- класифікатор забезпечує безпомилкове розпізнавання стану, якщо ознаки у багатовимірних діагностичних векторах є величинами одного порядку; вірогідність розпізнавання зменшується для діагностичних векторів, у яких ознаки є величинами різних порядків;

- при збільшенні кількості ознак у діагностичних векторах з 5 до 7 класифікатор забезпечує безпомилкове розпізнавання стану, якщо відхилення значень діагностичних ознак для дефектних класів не перевищує 12%; при цьому звужується діапазон значень параметру впливу мережі, в якому забезпечується безпомилкове розпізнавання, значно ускладнюється структура першого шару мережі через значне збільшення розмірності навчальної множини діагностичних векторів.

7. Проведено багатокласове розпізнавання стану резервуару за результатами досліджень комп'ютерної моделі об'єкта. В результаті дослідження напружено-деформованого стану моделі резервуару при появі та розвитку від однієї до трьох тріщин в зварних швах визначено значення максимальних напружень в місцях можливого встановлення сенсорів, отримані значення використано як діагностичні ознаки. Встановлено, що розроблений класифікатор забезпечує безпомилкове розпізнавання при локалізації одиничного пошкодження та багатоосередкового пошкодження (одночасна поява двох та трьох тріщин), визначено діапазон значень параметру впливу мережі, в якому забезпечується безпомилкове розпізнавання. Встановлено, що розроблений класифікатор забезпечує безпомилкове розпізнавання при моніторингу розвитку одиничного пошкодження, визначено діапазон значень параметру впливу мережі, в якому забезпечується безпомилкове розпізнавання.

8. Проведено багатокласове розпізнавання стану резервуарів за результатами досліджень фізичної моделі об'єкта. Зміна поточного стану фізичної моделі резервуару відбувалась шляхом зміни рівня її наповненості рідиною, як діагностичні ознаки використано значення показника Хьорста та приведені до частоти дискретизації значення частот двох домінуючих складових імпульсного відклику об'єкта. Встановлено діапазон значень параметру впливу мережі та визначено характеристики множини навчальних векторів і методу навчання для забезпечення безпомилкового розпізнавання.

9. Результати досліджень впроваджено в Публічному акціонерному товаристві «Науково-технічний комплекс «Електронприлад», Товаристві з обмеженою відповідальністю «Конструкторське бюро контрольних приладів» та в навчальний процес кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

## СПИСК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Рупіч С. С. Синтез нейронної мережі для багатокласової діагностики елементів конструкції в експлуатації / Н. І. Бурау, А. Г. Протасов, П. С. Мироненко, С. С. Рупіч // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2015. – № 2 (35). – С. 83–93. *Здобувачем побудовано загальну схему класифікатора стану для системи діагностики та створено його комп'ютерну модель.*

2. Рупіч С. С. Завдання та моделі багатокласової діагностики складних просторових об'єктів / Н. І. Бурау, С. С. Рупіч // Вісник Інженерної Академії України, 2017. – № 3. – С. 13-19. *Здобувачем розроблено інформаційні моделі процесів формування навчальних і тестових множин вхідних векторів для таких діагностичних завдань: локалізація пошкоджень, моніторинг розвитку пошкоджень, моніторинг деградації конструкції.*

3. Рупіч С. С. Локалізація пошкодження складного просторового об'єкту класифікатором на основі імовірнісної нейронної мережі / Н. І. Бурау, С. С. Рупіч // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Приладобудування. – 2017. – Вип. 54(2). – С. 12-19. (Входить до WorldCat, РИНЦ, IndexCopernicus, BASE, OpenAIRE та інших). *Здобувачем проведено багатокласове розпізнавання стану об'єкта, проаналізовано ефективність розробленого класифікатора та обґрунтовано параметри імовірнісної нейронної мережі для достовірної локалізації пошкоджень.*

4. Rupich S. Multi-class recognition of objects technical condition by classifier based on Probabilistic Neural Network / N. Bouraou, S. Rupich, D. Pivtorak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. – № 5/4 (89). – Р. 24-31. (Входить до Scopus, IndexCopernicus, BASE та інших). *Здобувачем проведено багатокласове розпізнавання стану об'єкта при деградації конструкції, встановлено залежності ефективності розпізнавання від параметру впливу мережі і розмірності навчальної множини діагностичних векторів.*

5. Rupich S. Problems of intellectualizing in the SHM systems: estimation, prediction, multi-class recognition / N. Bouraou, S. Rupich, S. Tsybulnik // Вісник Тернопільського національного технічного Університету. — Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2017. – Vol. 88. – № 4. – С. 135-144. (Входить до Inspec). *Здобувачем проведено багатокласове розпізнавання стану об'єкта при деградації конструкції за векторами діагностичних ознак різних порядків, проаналізовано ефективність розпізнавання.*

6. Rupich S. Monitoring of the Crack Propagation in Welded Joint of the Tank Using Multi-Class Recognition / N. Bouraou, S. Rupich, O. Lukianchenko, O. Kostina // Vibrations in Physical Systems. – 2018. – Vol. 29. – Р. 8. (Входить до Scopus, BazTech). *Здобувачем проведено багатокласове розпізнавання стану зварного резервуару при розвитку тріщини за зміною напружень в місцях встановлення сенсорів.*

7. Пат. 129647 Україна, МПК G01M 7/00. Інформаційно-діагностичний комплекс для моніторингу технічного стану складних просторових об'єктів / Бурау Н. І., Рупіч С. С., Цибульник С. О., Півторак Д. О.; заявник і патентовласник КПІ ім. Ігоря Сікорського. – № U201804012; заявл. 13.04.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21. – 5 іл. *Здобувачем обґрунтовано принципи роботи системи.*

8. Рупіч С. С. Огляд схем побудови керуючого модуля для системи діагностики / С. С. Рупіч // Погляд у майбутнє приладобудування: VIII науково-практична конференція студентів та аспірантів, 22-23 квітня 2015 р. : збірник тез доповідей. – К. : «Політехніка», – 2015. – С. 22.

9. Рупіч С.С. Засоби інтелектуалізації систем моніторингу на основі штучних нейронних мереж / С. С. Рупіч // Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: 5-та науково-практична конференція студентів і молодих учених, 24-25 листопада 2015 р. : збірник тез доповідей. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. – 2015. – С. 174–175.

10. Рупіч С. С. Нейронна мережа для багатокласової діагностики об'єктів // Н. І. Бурау, С. С. Рупіч // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування : мат. III Всеукр. наук.-техн. конф. – Х., 2016. – С. 98–99. *Здобувачем побудовано комп'ютерну модель нейромережевого класифікатора, проведено імітаційне моделювання.*

11. Рупіч С. С. Порівняльний аналіз ефективності багатокласового нейромережевого розпізнавання технічного стану об'єктів за діагностичними ознаками різних по-

рядків / Н. І. Бурау, С. С. Рупіч // Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування : мат. III Всеукр. наук.-техн. конф. : зб. тез доп., 8-9 черв. [2017 р.]. – Тернопіль : ФОП Паляниця В. А. – 2017. – С. 42-44. *Здобувачем проведено імітаційне моделювання та проаналізовано ефективність багатокласового розпізнавання за діагностичними ознаками різних порядків.*

12. Рупіч С. С. Проблеми інтелектуалізації в системах SHM: оцінювання, прогнозування, багатокласове розпізнавання / Н. І. Бурау, С. С. Рупіч, С. О. Цибульник // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування. Праці конф. : V Міжнар. наук.-техн. конф., 19-22 вер. [2017 р.]. – Тернопіль, 2017. – С. 234-237. *Здобувачем обґрунтовано принцип багатокласового розпізнавання складних просторових об'єктів нейромережесим класифікатором.*

13. Рупіч С. С. Моделювання процесу багатокласового розпізнавання для локалізації пошкодження складного просторового об'єкту / Н. І. Бурау, С. С. Рупіч // 4-а міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017)» : зб. тез доп., 31 жовт. – 2 лист. [2017 р.]. – Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс і К», 2017. – С. 171-172. *Здобувачем проведено імітаційне моделювання нейромережесим класифікатора та багатокласове розпізнавання для локалізації одиничного та багатоосередкового пошкодження.*

14. Рупіч С. С. Багатокласове розпізнавання технічного стану для локалізації пошкодження захисної ємності з дефектами / Н. І. Бурау, С. С. Рупіч // Приладобудування : стан і перспективи : XVII Міжнар. наук.-техн. конф. : зб. тез доп., 15 – 16 трав. [2018 р.]. – К. : Політехніка, 2018. – С. 28. *Здобувачем проведено багатокласове розпізнавання технічного стану зварного резервуару для локалізації одиничного пошкодження, визначено інтервал значень параметру впливу мережі для безпомилкового розпізнавання.*

15. Свідоцтво № 81609 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини навчальних векторів для побудови нейромережесим класифікатора багатокласового розпізнавання з метою локалізації двох пошкоджень» [Текст] Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. (Україна); заявник та власник Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. – № 81981; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 21.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір. *Здобувачем написано алгоритм формування множини навчальних векторів.*

16. Свідоцтво № 81610 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини навчальних векторів для побудови нейромережесим класифікатора багатокласового розпізнавання деградації конструкції при багатоосередковому пошкодженні» [Текст] Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. (Україна); заявник та власник Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. – № 81985; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 21.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір. *Здобувачем написано алгоритм формування множини навчальних векторів.*

17. Свідоцтво № 81613 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини тестових векторів для побудови нейромережесим класифікатора багатокласового розпізнавання з метою моніторингу розвитку пошкодження» [Текст] Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. (Україна); заявник та власник Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. – № 81991; заявл. 09.07.2018; зареєс-



тровано 21.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір. *Здобувачем написано алгоритм формування множини тестових векторів.*

18. Свідоцтво № 81679 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини тестових векторів для нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання деградації конструкції при багатоосередковому пошкодженні» [Текст] Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. (Україна); заявник та власник Рупіч С. С., Бурау Н.І., Півторак Д. О. – № 81979; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 25.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір. *Здобувачем написано алгоритм формування множини тестових векторів.*

19 Свідоцтво № 81680 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини тестових векторів для побудови нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання з метою локалізації двох пошкоджень» [Текст] Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. (Україна); заявник та власник Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. – № 81980; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 25.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір. *Здобувачем написано алгоритм формування множини тестових векторів.*

20. Свідоцтво № 81681 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини навчальних векторів для побудови нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання з метою локалізації одиничного пошкодження конструкції» [Текст] Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. (Україна); заявник та власник Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. – № 81983; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 25.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір. *Здобувачем написано алгоритм формування множини навчальних векторів.*

21. Свідоцтво № 81682 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини тестових векторів для побудови нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання з метою локалізації одиничного пошкодження конструкції» [Текст] Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. (Україна); заявник та власник Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. – № 81984; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 25.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір. *Здобувачем написано алгоритм формування множини тестових векторів.*

22. Свідоцтво № 81683 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Формування множини навчальних векторів для побудови нейромережевого класифікатора багатокласового розпізнавання з метою моніторингу розвитку пошкодження» [Текст] Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. (Україна); заявник та власник Рупіч С. С., Бурау Н. І., Півторак Д. О. – № 81986; заявл. 09.07.2018; зареєстровано 25.09.2018 р. в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір. *Здобувачем написано алгоритм формування множини навчальних векторів.*

## АНОТАЦІЯ

**Рупіч С. С. Багатокласове розпізнавання стану складного просторового об'єкта нейромережевим класифікатором. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2018.

Дисертація присвячена проведенню багатокласового розпізнавання стану складного просторового об'єкта шляхом вдосконалення та впровадження підсистеми прийняття рішення в систему функціональної діагностики на основі розробки нейромережевого класифікатора.

Розроблено інформаційні моделі процесів формування навчальних та тестових множин вхідних векторів діагностичних ознак для багатокласового розпізнавання з метою локалізації одиничного та багатоосередкового пошкодження, моніторингу розвитку пошкоджень і моніторингу деградації конструкції. Розроблено програмне забезпечення для визначених діагностичних завдань. Розроблено узагальнену структуру багатокласового розпізнавання.

Досліджено ефективність розробленого нейромережевого класифікатора для забезпечення багатокласового розпізнавання, та проведено розпізнавання технічного стану комп'ютерної та фізичної моделей резервуару. Встановлено впливи параметрів нейронної мережі та характеристик діагностичних векторів на вірогідність багатокласового розпізнавання стану об'єкта для діагностичних завдань.

**Ключові слова:** складний просторовий об'єкт, резервуар зі зварними з'єднаннями, багатоосередкове пошкодження, моніторинг технічного стану, багатокласове розпізнавання, нейромережевий класифікатор стану, імовірнісна нейронна мережа, вектор діагностичних ознак, ефективність класифікації.

## АННОТАЦИЯ

**Рупич С. С. Многоклассовое распознавание состояния сложного пространственного объекта нейросетевым классификатором. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук за специальностью 05.11.13 – приборы и методы контроля и определение состава веществ. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2018.

Диссертация посвящена проведению многоклассового распознавания состояния сложного пространственного объекта путем усовершенствования и внедрения подсистемы принятия решения в систему функциональной диагностики на основе разработки нейросетевого классификатора.

Разработаны информационные модели процессов формирования учебных и тестовых множеств входных векторов диагностических признаков для многоклассового распознавания с целью локализации единичного и множественного повреждения, мо-

мониторинга развития повреждений и мониторинга деградации конструкции. Разработано программное обеспечение для предопределенных диагностических задач. Разработана обобщенная структура многоклассового распознавания.

Исследована эффективность разработанного нейросетевого классификатора для обеспечения многоклассового распознавания, и проведено распознавание технического состояния компьютерной и физической моделей резервуара. Установлено влияние параметров нейронной сети и характеристик диагностических векторов на вероятность многоклассового распознавания состояния объекта для диагностических задач.

**Ключевые слова:** сложный пространственный объект, резервуар со сварными соединениями, многоочаговое повреждение, мониторинг технического состояния, многоклассовое распознавание, нейросетевой классификатор состояний, вероятностная нейронная сеть, вектор диагностических признаков, эффективность классификации.

## SUMMARY

**Rupich S. Multi-class recognition of objects technical condition by a classifier based on Neural Network.– Qualifying scientific work, the manuscript.**

Thesis for a candidate degree (PhD) in specialty 05.11.13 "Instruments and methods for controlling and determining the composition of substances".– National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2018.

The thesis describes that complex spatial objects of aeronautical engineering, oil-and-gas industry, special purpose objects are usually operated in difficult accessible places in zones with increased external influences and dynamic loads. It is described that multi-site damage can be aroused under such conditions of operation due to imperfection of the elements of the construction that are used under the action of complex loading. It is shown that in order to ensure the safe operation of complex spatial objects that are characterized by multi-class of possible technical states, it is necessary to carry out continuous monitoring of structural integrity and provide multi-class diagnostics.

The basic principles and approaches of construction and organization a new type of intelligent multi-class monitoring systems have been considered. It is described approaches to building a network of sensitive elements. The basic methods of information processing in monitoring systems have been considered. The development tendencies and ways of improvement of newest diagnostic systems are described. It is shown diagnostic problems which are solved by intellectual monitoring systems that based on Structural Health Monitoring concept.

It is shown that traditional methods of recognition are functionally limited to solving multi-class diagnostics. The basic principles of neural network approach and application features of neural networks in monitoring and diagnostic systems are considered. The general model of the neural network is given, the types of activation functions and the architectures of neural network construction are described. The basic models of training of artificial neural networks are also described. It shows that the tasks of multi-class diagnostics, estimation and future prediction of the technical condition of complex spatial objects with multi-site damage are not solved enough; the issue of methodological and algorithmic support for the develop-

ment of multi-class diagnostic tools based on information technologies is not disclosed according to the literature.

The thesis describes that the most rigid conditions for the preservation of integrity put forward to the welded tanks with ecologically dangerous substances. The basic general technical requirements for automated systems of early prediction of defects appearance, possible destruction and fuel leaks that based on implementing the concept of Structural Health Monitoring are described. It is presented the general structure of the functional diagnostics system for monitoring the technical condition of the tank. In the dissertation the subsystem of decision-making is substantiated and developed to improve the functional diagnostics system of the technical condition of the welded tank.

It is substantiated that using Probabilistic Neural Network, which provides the best results of a multi-class recognition, for the development of the classifier. The general structure of the neural network classifier is developed. The functional building features of Probabilistic Neural Network are shown.

Models of processes for forming sets of input vectors of diagnostic features for such diagnostic tasks as localization of single damage, localization of multi-site damage, monitoring of damage development and monitoring of structural degradation are developed. A generalized information model of the system of multi-class recognition, which combines the diagnostic tasks, is developed.

The program implementation of the neural network classifier is carried out by the Matlab software environment. As a result, the probability of recognition from the network influence parameter, which shows the effectiveness of the neural network classifier for localization of single damage and localization of two defects, was established. Research has shown that it is possible to develop classifiers based on Probabilistic Neural Network with one set value of the spread parameter, which will achieve error-free multi-class recognition for the diagnostic tasks of localization. According to the results of the research of the efficiency of the classifier for the monitoring of a development of damage, it has been established that a error-free multi-class recognition of the object's status is achieved. Range of values of the spread parameter established by an empirically way.

The influence of the parameters of a neural network and characteristics of diagnostic vectors on the probability of multi-class recognition of the object's state for monitoring of structural degradation is investigated. The research of the influence of number of training vectors on the recognition quality has been performed. It is shown that a decrease in the number of the training set impairs the recognition quality. The research of influence of different range of diagnostic features is carried out. It is shown that error-free recognition by the developed classifier is achieved provided that the values of the diagnostic features are within the same range.

The research of the influence of number of diagnostic features in vectors on the recognition efficiency was performed. It was found that changes in a number of features from 5 to 7 lead to a significant complication for the construction of a neural network and an increase of the training set by 4 times. Also, the quality of recognition is reduced.

The research of the possibility of the error-free recognition was conducted by the developed classifier based on the stress-strain state of the geometric model of the tank structural elements with multi-site damage, where sensors are located. The state recognition of the tank in cases for localization of damage of separate occurrence of three cracks, the simulta-

neous occurrence of several cracks and monitoring of the development of one crack were carried out. It is shown that the classifier provides an error-free recognition depending on established parameters of the neural network. It is identified that using a classifier based on Probabilistic Neural Network is effective for the recognition of cracks in welds of tanks.

The physical model of the tank was made. Based on its statistical analysis of the results of the vibration measurements were researched the recognition of the technical state of its structure. The Hurst coefficients were determined from measured vibration signals. The two dominant frequencies of the oscillations were calculated and reduced to dimensionless magnitude using the sampling frequency. Both the Hurst coefficients and frequencies determine the functional dependence of changes in the current state of the tank on its filling with liquid from 0 % to 100 %. It is shown possibility of using the designed neural network classifier for recognizing real objects has been confirmed.

**Keywords:** complex dimensional object, tank with welded joints, multi-focal damage, Structural Health Monitoring, multi-class recognition, neural network classifier, Probabilistic Neural Network, vector of diagnostic signs, classification efficiency.

Підп. до друку 20.03.2019.    Формат 60х90 <sup>1</sup>/16  
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9  
Наклад 100 прим. Замовлення № 467  
Віддруковано на різнографі в видавничому центрі “Принт-центр”  
040053, м. Київ, вул. Січових Стрільців, 26А  
Тел./факс: 486-50-88, 332-41-10, 277-40-16  
<http://www.printc.com.ua>. E-mail [printcentr@ukr.net](mailto:printcentr@ukr.net)